

高硫硅锰合金脱硫研究

朱子宗, 樊金环, 李 钦, 谢泽伟

(重庆大学 材料科学与工程学院, 重庆 400044)

摘 要: 针对高硫硅锰合金, 采用高温硅钼炉、XRD 以及常规化学分析法, 研究了 $\text{CaO}-\text{BaO}-\text{MgO}-\text{SiO}_2-\text{CaF}_2$ 五元脱硫渣系中 MgO , CaO , BaO 对脱硫效果的影响. 研究表明: 随着 BaO 与 CaO 质量比的增加, 脱硫率先升高后降低. 当 MgO 的质量分数为 8%, CaF_2 的质量分数为 10%, BaO 与 CaO 的质量比为 0.914 3 时, 脱硫率达到 94.4%; 当 MgO 的质量分数为 12%, CaF_2 的质量分数为 14%, BaO 与 CaO 的质量比为 0.787 9 时, 脱硫率达到 95.4%. 当 CaO 的质量分数为 35%, BaO 的质量分数为 32% 时, 随着 MgO 质量分数的增加脱硫率先升高后降低, MgO 的质量分数为 8% 时, 渣的脱硫能力最高.

关 键 词: 高硫硅锰合金; $\text{CaO}-\text{BaO}-\text{MgO}-\text{SiO}_2-\text{CaF}_2$ 渣系; 硫容量; 脱硫; XRD 分析

中图分类号: TF 642

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2014)10-1468-05

Desulfurization of SiMn Alloy with High Sulfur

ZHU Zi-zong, FAN Jin-huan, LI Qin, XIE Ze-wei

(College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China. Corresponding author: ZHU Zi-zong, E-mail: zhuzizong@163.com)

Abstract: The effects of MgO , CaO , BaO in $\text{CaO}-\text{BaO}-\text{MgO}-\text{SiO}_2-\text{CaF}_2$ slag on the desulfurization of SiMn alloy with high sulfur were studied in a silicon molybdenum furnace, and with XRD and chemical analyses. The results showed that the desulfurization ability rises first and then falls with increasing $m(\text{BaO}):m(\text{CaO})$ ratio. When the mass fractions of MgO and CaF_2 are 8% and 10% respectively, and $m(\text{BaO}):m(\text{CaO})$ is 0.914 3, the desulfurization efficiency reaches to 94.4%. When the mass fractions of MgO and CaF_2 are 12% and 14% respectively, and $m(\text{BaO}):m(\text{CaO})$ is 0.787 9, the desulfurization efficiency reaches to 95.4%. Meanwhile, when the mass fractions of CaO and BaO are 35% and 32% separately, the desulfurization ability rises first and then falls with increasing the mass fraction of MgO , and the desulfurization effect is the best when the mass fraction of MgO is 8%.

Key words: SiMn alloy with high sulfur; $\text{CaO}-\text{BaO}-\text{MgO}-\text{SiO}_2-\text{CaF}_2$ slag system; sulfur capacity; desulfurization; XRD analysis

硅锰合金一般用作钢液二次精炼的脱氧剂或合金添加剂, 因其具有脱氧效果好、成本低等特点而得到广泛的应用. 如果锰硅合金中硫的质量分数过高, 则会污染钢液, 使钢液中的硫的质量分数增加, 导致钢的质量下降^[1]. 因此, 应控制锰硅合金中硫的质量分数, 使其越低越好. 而近年来几乎没有任何关于锰硅合金脱硫的文献报道, 甚至从锰矿石冶炼成为锰硅合金过程中如何脱硫的文献也较少^[2-5]. 目前, 我国城口、秀山等地区生产的锰硅合金中硫的质量分数严重超标, 导致产品贬

值, 制约着当地企业的发展. 因此, 进一步完善锰硅合金脱硫的相关理论对实现高硫锰硅合金国际化具有一定的理论和现实意义.

1 CaO 基渣系脱硫理论基础

由于石灰储量丰富、价格低廉, 人们致力于石灰基渣剂的研究与开发, 取得了一定的成果^[6-8].

CaO 对脱硫的影响见方程式(1):

$$[\text{MnS}] + (\text{CaO}) = [\text{MnO}] + (\text{CaS}). \quad (1)$$

CaO 质量分数的增加有利于生成更加稳定的 CaS 进入炉渣,从而达到脱硫的目的. 因此,从理论上来说 CaO 的质量分数越高越好,但是 CaO 的质量分数过高会导致炉渣流动性降低.

BaO 脱硫与 CaO 相似,见方程式(2):

[MnS] + (BaO) = [MnO] + (BaS). (2)

李素芹等^[8]认为超低硫钢脱硫渣 CaO – BaO – CaF₂ 中 $m(\text{CaO}):m(\text{BaO})=5:3$ 时, L_s (硫的分配比) 达到最大值. 由于 BaO 在渣中的离子半径较 CaO 大,离子间作用力较小,且 BaO 的离子分数比 CaO 的大,因此 BaO 更容易释放出氧离子,较 CaO 的脱硫效果好. 在 1 723 K 下, BaO, CaO 的标准吉布斯自由能分别为: $\Delta G_{\text{BaO}}^\ominus = 20\,866.3\text{ J/mol}$, $\Delta G_{\text{CaO}}^\ominus = 57\,050.2\text{ J/mol}$ ^[9], 说明在 1 723 K 下, 单独用 BaO 或者 CaO 脱硫时, BaO 的化学势比 CaO 的化学势大,更有利于脱硫.

实验用石墨坩埚,假设 P_{CO} 为一个大气压.

$$\text{C}(\text{S}) + \frac{1}{2}\text{O}_2 = \text{CO}(\text{g}), \tag{3}$$

$$\Delta G = -114400 - 85.77T(\text{J/mol}), \tag{4}$$

$$P_{\text{O}_2} = \left[\frac{P_{\text{CO}}}{a_{\text{C}} e^{\frac{-\Delta G}{RT}}} \right]. \tag{5}$$

碳饱和时, $a_{\text{C}} = 1$, 当 P_{CO} 为一个大气压, $P_{\text{O}_2} = 3 \times 10^{-6}\text{ Pa}$, 而氧分压小于 0.1 Pa 时, 脱硫产物为硫化物, 因此有效的硫容量表示方法为硫化物容量^[10–12].

从硫化物容量分析^[13],

$$\frac{1}{2}\text{S}_2(\text{g}) + (\text{O}^{2-}) = (\text{S}^{2-}) + \frac{1}{2}\text{O}_2(\text{g}), \tag{6}$$

$$K = \frac{w_{\text{S}} f_{\text{S}^{2-}} p_{\text{O}_2}^{1/2}}{a_{\text{O}^{2-}} p_{\text{S}_2}^{1/2}}, \tag{7}$$

$$C_{\text{S}^{2-}} \equiv w_{\text{S}} \left[\frac{p_{\text{O}_2}}{p_{\text{S}_2}} \right]^{1/2} = \frac{K a_{\text{O}^{2-}}}{f_{\text{S}^{2-}}}. \tag{8}$$

式中: w_{S} 为渣中 S 的质量分数; $f_{\text{S}^{2-}}$ 为渣中硫的活度系数.

加入 BaO 后, O^{2-} 活度变大, 而且 BaS 比 CaS 稳定, 渣的硫化物容量变大. 但是, BaO 的相对分子质量为 153, CaO 的相对分子质量为 56, 所以渣中 BaO 的质量分数增大而 CaO 的质量分数相对减少时, 渣中碱性组元的物质的量也会相对减少, 使得相同质量的渣的可固定的 S^{2-} 减少, 熔渣的脱硫能力降低.

在上述基础上, 本实验选择优化的 CaO – BaO – MgO – SiO₂ – CaF₂ 五元脱硫渣系进行锰硅合金脱硫实验.

2 实 验

2.1 实验原料

本实验结合城口、秀山地区锰硅合金生产特点, 非标合金硫质量分数最高达到 0.08% 左右. 因此, 实验过程中在原有合金基础上配适量的硫化亚铁, 硅锰合金中硫的质量分数见表 1.

表 1 硅锰合金中硫的质量分数

Table 1 $w(\text{S})$ of silicon-manganese alloy %		
样品号	原样	配硫后
1	0.051	0.083
2	0.052	0.081
3	0.056	–
平均值	0.053	0.082

2.2 实验设备及方法

实验在额定功率为 9 kW 的硅钼棒炉中进行, 用双铂铑 (PtRh30 – PtRh6) 热电偶测温, UJ – 36 型电位差计校正温度, DWT – 702 型精密温度控制仪控温, 温度波动范围为 $\pm 2\text{ }^\circ\text{C}$, 系统见图 1.

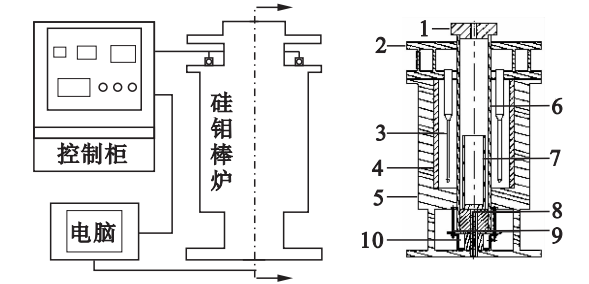


图 1 硅钼棒炉及控制系统
Fig. 1 Molybdenum silicon bar electric resistance furnace and control system

1—炉管盖; 2—炉盖; 3—硅钼棒; 4—高铝套管; 5—炉身; 6—刚玉管; 7—坩埚; 8—热电偶; 9—密封垫; 10—底座.

首先将炉温升到 1 450 $^\circ\text{C}$, 把装有合金样的石墨坩埚放入炉内、加热 20 min 熔化合金, 然后将渣 (20%) 迅速覆盖在金属液的表面, 直到坩埚中的物质全部熔化. 开始记录脱硫时间, 设定脱硫时间为 40 min. 从反应计时开始每隔 10 min 搅拌 1 次, 共搅拌 3 次. 取出坩埚空冷, 制合金样, 用红外碳硫测定仪分析合金中硫的质量分数.

方案及实验结果见表 2 ~ 表 4.

MgO 单因素实验以第 5 组实验为基础, 保持 CaO, BaO, SiO₂, CaF₂ 四者的质量不变, 13 组减少 1.6 g MgO; 14 组增加 1.6 g MgO, 然后在新的质量比的基础上折算出表 4.

表 2 $m(\text{BaO}):m(\text{CaO})$ 对脱硫效果影响
Table 2 Effect of $m(\text{BaO}):m(\text{CaO})$ on desulfurization %

编号	CaO	BaO	MgO	CaF ₂	SiO ₂	S
1	55	12	8	10	15	0.023 0
2	48	19	8	10	15	0.009 3
3	41	26	8	10	15	0.012 0
4	37	30	8	10	15	0.006 1
5	35	32	8	10	15	0.004 6
6	33	34	8	10	15	0.004 9

表 3 不同 $w(\text{MgO} + \text{CaF}_2)$ 时 $m(\text{BaO}):m(\text{CaO})$ 对脱硫效果的影响
Table 3 Effect of $m(\text{BaO}):m(\text{CaO})$ on desulfurization under different $w(\text{MgO} + \text{CaF}_2)$ %

编号	CaO	BaO	MgO	CaF ₂	SiO ₂	S
7	35	28	10	12	15	0.002 2
8	33	30	10	12	15	0.003 4
9	31	32	10	12	15	0.006 9
10	35	24	12	14	15	0.004 8
11	33	26	12	14	15	0.003 8
12	31	28	12	14	15	0.006 9

表 4 $w(\text{MgO})$ 对脱硫效果影响
Table 4 Effect of $w(\text{MgO})$ on desulfurization %

编号	CaO	BaO	MgO	CaF ₂	SiO ₂	S
13	35.7	32.7	6.1	10.2	15.3	0.009 2
14	34.3	31.3	9.8	9.8	14.7	0.008 0

3 讨 论

3.1 BaO,CaO 对脱硫效果的影响

实验所用 CaCO_3 比 CaO 更有利于脱硫.

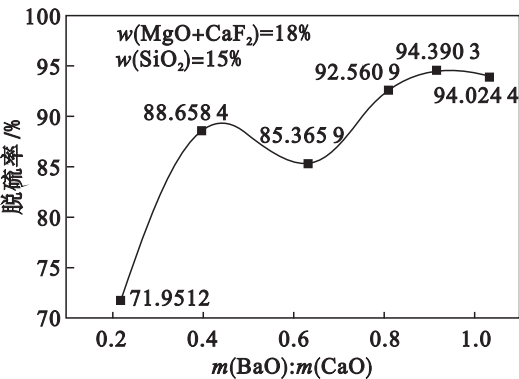


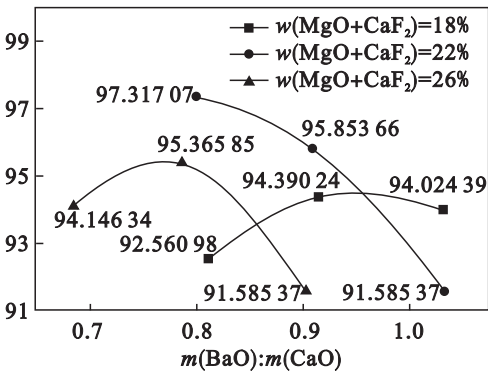
图 2 $m(\text{BaO}):m(\text{CaO})$ 对脱硫率的影响
Fig. 2 Effect of $m(\text{BaO}):m(\text{CaO})$ on desulfurization rate

$w(\text{MgO} + \text{CaF}_2) = 22\%$ 时的脱硫效果整体好于 $w(\text{MgO} + \text{CaF}_2) = 26\%$ 时的脱硫效果. 其原因在于随着 $w(\text{MgO} + \text{CaF}_2)$ 的增加, $w(\text{CaO} + \text{BaO})$ 减少, 渣中碱性物质减少, O^{2-} 活度降低, 使

CaCO_3 分解吸热, 但是分解后产生 CO_2 将 Si 氧化放出热量, 可以补偿这一温度损失. CaO 与 SiO_2 生成部分难熔的 $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$, 但是 CaF_2 可以促进熔融层作为脱硫媒介, 促进脱硫^[14]. BaO 与渣中的 CaO , SiO_2 生成低熔点相 $2\text{CaO} \cdot \text{BaO} \cdot 3\text{SiO}_2$, $2\text{BaO} \cdot \text{SiO}_2$ (熔点 $1\,760\,^\circ\text{C}$)^[15], 能改善渣流动性; 同时, BaO 为碱性氧化物, 其光学碱度^[16-17] 为 1.15, 渣中加入一定量的 BaO 能提高渣的碱度, O^{2-} 活度增大, 由式 (8) 可知提高了硫容量.

如图 2a 所示: 在保持五元渣系 $\text{CaO} - \text{BaO} - \text{MgO} - \text{CaF}_2 - \text{SiO}_2$ 中的 $w(\text{MgO}) = 8\%$, $w(\text{CaF}_2) = 10\%$, $w(\text{SiO}_2) = 15\%$ 不变的情况下, 随着 $m(\text{BaO}):m(\text{CaO})$ 的增加, 脱硫率提高. 其中, $w(\text{CaO}) = 35\%$, $w(\text{BaO}) = 32\%$ 时达到最好的脱硫效果. 而 $m(\text{BaO}):m(\text{CaO})$ 超过或者低于这一比例都会使脱硫效果下降.

如图 2b 所示: 结合图 2a 的数据, $w(\text{MgO} + \text{CaF}_2) = 18\%$ 时, $m(\text{BaO}):m(\text{CaO}) = 0.914\,3$ 时达到最佳脱硫效果; $w(\text{MgO} + \text{CaF}_2) = 26\%$ 时, $m(\text{BaO}):m(\text{CaO}) = 0.787\,9$ 达到最佳脱硫效果; 而 $w(\text{MgO} + \text{CaF}_2) = 22\%$ 时曲线未出现最佳值; $m(\text{BaO}):m(\text{CaO}) = 0.800\,0$ 时达到实验范围内最佳值, 并且通过另外两条曲线分析, 可以认为达到最佳脱硫效果的 $m(\text{BaO}):m(\text{CaO})$ 会随着 $w(\text{MgO} + \text{CaF}_2)$ 的变化而变化, 因此推断此条件下达到最佳效果的 $m(\text{BaO}):m(\text{CaO})$ 在 0.787 9 到 0.800 0 之间.



得脱硫效果整体降低. 而 $w(\text{MgO} + \text{CaF}_2) = 18\%$ 时的脱硫效果比前两者差是由于渣中 $w(\text{CaF}_2)$ 比前两者分别少 2%, 4%, 导致渣流动性下降, 脱硫率降低.

3.2 MgO 对脱硫效果的影响

MgO 属于碱性氧化物,碱性弱于 CaO,脱硫产物 MgS(2 000 ℃)熔点也低于 CaS(2 450 ℃).但是实际情况中脱硫率并不是随着 $w(\text{MgO})$ 的增加而降低.

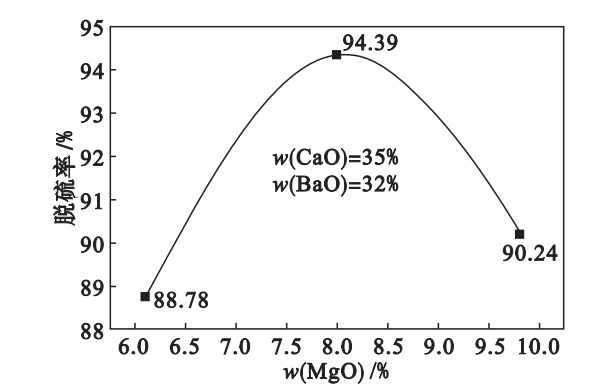


图 3 $w(\text{MgO})$ 对脱硫率的影响
Fig. 3 Effect of $w(\text{MgO})$ on desulfurization rate

如图 3 所示,当 $w(\text{CaO}) = 35\%$, $w(\text{BaO}) = 32\%$ 时,随着渣中 $w(\text{MgO})$ 的增加,脱硫率先升高后降低. $w(\text{MgO})$ 为 8% 时,脱硫能力最强,达到 94.39% . $w(\text{MgO})$ 分别为 6.1% , 9.8% 时,脱硫率分别为 88.78% , 90.24% ,三组渣熔化时间分别为 20,25,31 min,渣样的流动性不断下降. 实验结果与文献[18]结果一致,即渣中 $w(\text{MgO})$ 为 8% 时,渣的脱硫能力较高,当 $w(\text{MgO}) > 8\%$ 时大量的 MgO 会使渣中出现难熔的方镁石,显著提高熔渣黏度,使脱硫动力学条件变差,熔渣脱硫能力降低.

3.3 渣样 XRD 分析

选取脱硫后的 6 号渣样进行 XRD 检测,分析其脱硫产物,其结果如图 4 所示. 由图 4 可知渣中脱硫产物为 BaS, CaS, MgS, 说明五元渣系中的 BaO, CaO, MgO 都是有效的脱硫剂,该实验条件下可以进行有效脱硫. 渣中有氧化物与 SiO_2 生成的低熔点物质降低了渣的熔点. 渣中并未发现 MnS,说明锰基合金中的锰在脱硫过程中未损失.

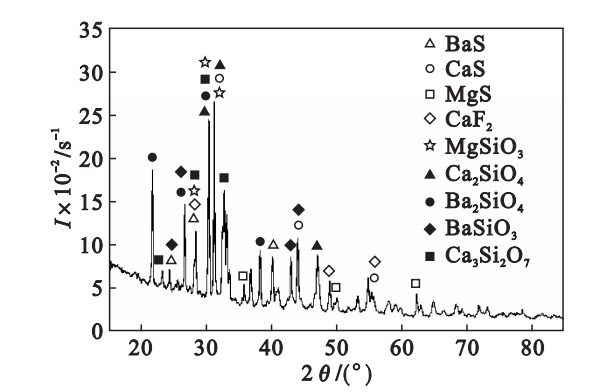


图 4 6 号渣样 X 射线衍射图谱
Fig. 4 XRD pattern of slag sample 6

4 结 论

1) 随着 $m(\text{BaO}):m(\text{CaO})$ 的上升,脱硫率先升高后降低,并且 $w(\text{MgO} + \text{CaF}_2)$ 的变化会影响达到最佳脱硫率时的 $m(\text{BaO}):m(\text{CaO})$; 当 $w(\text{MgO} + \text{CaF}_2) = 18\%$, $w(\text{SiO}_2) = 15\%$, $m(\text{BaO}):m(\text{CaO}) = 0.9143$ 时,脱硫率最高达 94.4% ; 当 $w(\text{MgO} + \text{CaF}_2) = 26\%$, $w(\text{SiO}_2) = 15\%$, $m(\text{BaO}):m(\text{CaO}) = 0.7879$ 时,脱硫率最高达 95.4% .

2) 当 $w(\text{CaO}) = 35\%$, $w(\text{BaO}) = 32\%$ 时,随着 $w(\text{MgO})$ 的增加,脱硫率先升高后降低, $w(\text{MgO}) = 8\%$ 时,渣的脱硫能力最高.

参考文献:

[1] 谭柱中,梅光贵,李维健,等. 锰冶金学[M]. 长沙:中南大学出版社,2004:12.
(Tan Zhu-zhong, Mei Guang-gui, Li Wei-jian, et al. Manganese metallurgy [M]. Changsha: Central South University Press,2004:12.)

[2] 龙延椿. 贵州团溪锰矿磁选配烧结矿烧结合硫量控制的探讨[J]. 中国锰业,1997,15(2):28-31.
(Long Yan-chun. Control of sulphur content in roasted manganese ores of Guizhou Tuanxi[J]. China's Manganese Industry,1997,15(2):28-31.)

[3] 彭志坚,陈树军,彭锋. 高硫锰矿脱硫的试验研究[J]. 中国锰业,2003,21(4):29-32.
(Peng Zhi-jian, Chen Shu-jun, Peng Feng. Investigation on desulphurization of high sulphur manganese ore[J]. China's Manganese Industry,2003,21(4):29-32.)

[4] 刘希文. 硅锰合金降硫的初步尝试[J]. 铁合金,1990(3):9-10.
(Liu Xi-wen. Preliminary test for reducing sulphur content of silicomanganese alloy[J]. Ferro-Alloys,1990(3):9-10.)

[5] 舒莉,戴维. 硅锰合金含硫量的控制[J]. 铁合金,1994(4):7-11.
(Shu Li, Dai Wei. Sulphur content's controlling of Mn-Si alloy[J]. Ferro-Alloys,1994(4):7-11.)

[6] 伊藤公久,佐野信雄. 溶铁处理温度における石灰系スラグと炭素飽和溶鉄間のりんの分配平衡[J]. 鉄と鋼,1983,69(15):1747-1754.
(Ino Kimihisa, Sano Nobuo. Equilibrium phosphorus distribution between CaO-containing slag and carbon-saturated iron at hot metal pretreatment temperature [J]. Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan,1983,69(15):1747-1754.)

[7] 眞目薫,松尾亨. MnO₂を含む石灰系フラックスによる溶鉄の脱りん及び脱硫[J]. 鉄と鋼,1983,69(15):1787-1794.
(Kaoru Shinme, Tohru Matsuo. Dephosphorization and

desulphurization of hot metal by CaO-based flux containing MnO₂ [J]. *Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan*,1983,69(15):1787-1794.)

[8] 李素芹,李士琦,朱荣,等. 高硫容量含 BaO 超低硫钢精炼脱硫渣系[J]. 特殊钢,2002,25(2):23-24.

(Li Su-qin,Li Shi-qi,Zhu Rong,et al. High sulphur capacity slag series containing BaO for ultra-low sulphur steel refining [J]. *Special Steel*,2002,25(2):23-24.)

[9] 黄希祐. 钢铁冶金原理[M]. 北京:冶金工业出版社,2010:242.

(Huang Xi-gu. Ferrous metallurgical principle[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press,2010:242.)

[10] Fincham C J B,Richardson F D. The behaviour of sulphur in silicate and aluminate melts [J]. *Proceedings of the Royal Society of London Series A: Mathematical and Physical Sciences*,1954:223(1152):40-62.

[11] Richardson F D,Frederick D. Physical chemistry of melts in metallurgy[M]. New York:Academic Press,1974:291.

[12] Abraham K P,Richardson F D. Sulfide capacities of silicate melts[J]. *Journal of the Iron and Steel Institute*,1960,196:313.

[13] 杨学民,郭占成. 冶金炉渣硫化物容量指数与碱度的关系 [J]. 钢铁研究学报,1995,7(6):1-8.

(Yang Xue-min, Guo Zhan-cheng. Correlation between sulphide capacity index and slag basicity[J]. *Journal of Iron and Steel Research*,1995,7(6):1-8.)

[14] Turkdogan F T. Slags and fluxes for ferrous metallurgy [J]. *Iron and Steelmaking*,1995,2:64-68.

[15] Li G R. Effect of strong basic oxide(Li₂O,Na₂O,K₂O and BaO) on property of CaO-based flux [J]. *Journal of Iron and Steel Research*,2003,10:6-11.

[16] Sosinsky D J, Sommerville I D. The composition and temperature dependence of the sulfide capacity of metallurgical slags [J]. *Metallurgical Transactions B*,1986,17:331-337.

[17] Venkatadri A S, Srinivasan C R, Gupta S K. Prediction of sulfide capacities of blast furnace slags [J]. *Scandinavian Journal of Metallurgy*,1989,18(2):89-94.

[18] Duffy J A, Ingram M D. Optical basicity [J]. *Journal of Inorganic and Nuclear Chemistry*, 1975, 37(5):1203-1206.

(上接第 1411 页)

表 4 不同冷却速度下实验钢的力学性能						
Table 4 Mechanical properties of experimental steel at different cooling rates						
冷却速度/(℃·s ⁻¹)	R _f /MPa	R _m /MPa	R _f /R _m	n	A ₅₀ /%	r
10	328.88	484.24	0.68	0.24	37.81	1.87
20	287.76	446.16	0.65	0.26	35.81	1.50
30	287.25	442.82	0.65	0.27	36.00	1.36
40	286.98	435.97	0.66	0.28	35.31	1.28

3 结 论

1) 随着加热速度的升高、退火温度的增加及冷却速度的增大,B250P 钢晶粒尺寸增大;随着保温时间的增加,晶粒尺寸呈先减小后增大的趋势。

2) B250P 钢在退火过程中,析出了 NbC 和 TiC,其尺寸小于 30 nm,因此具有钉扎位错和大角度晶界及细化晶粒的作用。

3) 随着加热速度的升高,B250P 钢的 r 值增大;随着冷却速度的增加,r 值减小;提高退火温度和保温时间,r 值先增大后减小。

参考文献:

[1] Ghosh P,Ray R K,Bharracharya B. Precipitation and texture formation in two cold rolled and batch annealed interstitial-free high strength steels[J]. *Scripta Materialia*,2006,55:271-274.

[2] Haldar A. Microstructural and textural development in an extra low carbon steel during warm rolling [J]. *Materials Science and Engineering A*,2005,391:402-407.

[3] Choi S H,Jin Y S. Evaluation of stored energy in cold-rolled steels from EBSD data [J]. *Materials Science and Engineering A*,2004,371:149-159.

[4] 康永林. 现代汽车板工艺及成形理论与技术[M]. 北京:冶金工业出版社,2009:49-123.

(Kang Yong-lin. Theory and technology of processing and forming for advanced automobile steel sheets [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press,2009:49-123.)

[5] 姚贵升. 汽车用钢应用技术[M]. 北京:机械工业出版社,2007:269-291.

(Yao Gui-sheng. Applied technology for automobile steel [M]. Beijing:China Machine Press,2007:269-291.)

[6] Xu G,Xu C,Zhao J,et al. Flow stress constitutive model of ultra low carbon steel in warming deformation [J]. *ISIJ International*,2006,46:166-168.

[7] Jeong W C. Effect of hot-rolling temperature on microstructure and texture of an ultra-low carbon Ti-interstitial-free steel[J]. *Materials Letters*,2008,62:91-94.

[8] Wang Z C, Wang F. Properties, microstructures and precipitate morphology of hot-rolled interstitial-free (IF) steel sheets [J]. *Journal of Material Science and Technology*,2001,17:143-144.